

Generador eléctrico excitado por la vibración, como fuente de alimentación para sistema de monitoreo de puentes

Electric generator excited by vibration, as a power supply for bridge monitoring system

Angélica Valeska Calderón¹ Alejandro Gonzalez-Revilla¹, Jhon Ferguson¹, José Puga¹, Victoria Serrano^{2*}

¹Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Facultad de Ingeniería Eléctrica, Centro Regional de Chiriquí, Universidad Tecnológica de Panamá.

Resumen La salud estructural de los puentes juega un papel fundamental en el desarrollo urbano de cualquier ciudad. Para asegurar su buen mantenimiento y vida útil, es necesario realizar monitoreo de estos, sin embargo, este trabajo tiende a volverse tedioso, ya que se debe pasar largas jornadas bajo las condiciones ambientales presentes en el puente, además de recurrir a la utilización de una fuente de alimentación no renovable para hacer uso del sistema. A lo largo de este documento, se presenta un estudio sobre la factibilidad de un sistema generador de energía por las vibraciones naturales del puente, a través del uso de materiales piezoeléctricos, que funcionaría como una opción viable para la alimentación del sistema de monitoreo, volviéndolo autosuficiente, permitiendo así que este permanezca en el puente de forma semi permanente, sin ningún problema, reduciendo de esta manera el uso de personal de trabajo para el monitoreo y anulando el uso de energías no renovables para la alimentación del sistema, de forma permanente.

Palabras clave Desplazamiento, frecuencia, material piezoeléctrico, puente, vibración, voltaje.

Abstract The structural health of bridges takes a fundamental role in the urban development of any city. To ensure their good maintenance and useful life, it is necessary to monitor them. However, this work tends to become tedious, since long hours must be spent observing the environmental conditions of the bridge. In addition, it becomes necessary to use a non-renewable power source to make use of the system. Throughout this document, a study is presented on the feasibility of a power generating system that would make use of the natural vibrations of the bridge. The use of piezoelectric materials, to power the monitoring system would make it self-sufficient, thus allowing it to remain on the bridge semi-permanently without any problem. This in turn would reduce the use of work personnel for monitoring and would permanently cancel the use of non-renewable energies to power the system.

Keywords Displacement, frequency, piezoelectric material, bridge, vibration, voltage.

* Corresponding author: victoria.serrano@utp.ac.pa

1. Introducción

El desarrollo sostenible de una sociedad está vinculado directamente a los avances tecnológicos que permitan responder a las necesidades básicas del ser humano. Como seres naturalmente sociales, hacemos uso cotidiano de medios de comunicación urbanos, específicamente estructuras como los puentes, que responden a la exigencia de un traslado eficiente y seguro.

Estas estructuras, por su material y factores ambientales, tienden a deteriorarse a medida que pasa el tiempo, por lo cual, se requiere un monitoreo eficiente de los mismos, para asegurar su durabilidad [1].

Anteriormente para identificar un problema en el puente, se necesitaban largas jornadas de trabajo, con un alto consumo eléctrico a largo plazo, para alimentar los sensores de monitoreo. Estos medían principalmente la aceleración, frecuencia y torsión de los puentes, gracias a una tarjeta

Arduino que almacenaba los datos obtenidos [1]. El costo de un monitoreo depende del personal y cantidad de mediciones que se tomen, convirtiéndose en un trabajo tedioso físicamente, pues requiere de la presencia del personal en el puente. Además, la mayoría de los sistemas de monitoreo de puentes funcionan con baterías, y la vida útil de las mismas, restringe el rendimiento del sistema [2].

¿Cómo se puede solucionar la poca eficiencia en los sistemas de monitoreo de puentes? La autonomía de los sensores de monitoreo supone una estrategia factible para la optimización del trabajo [6], para ello es necesaria una fuente de energía alternativa, la energía solar, eólica y por vibración se encuentran dentro de las posibilidades. Sin embargo, al momento de considerarlas es necesario un análisis más profundo sobre la localización de los transformadores de energía. En el caso de la energía solar y eólica, las posiciones de los generadores eólicos afectarían la estructura del puente y

se mantendrán condicionadas por los factores ambientales. Además, en el caso de paneles solares, se supone un alto mantenimiento de limpieza, que genera sobrecostos para el monitoreo de los puentes [3].

Se necesita un sistema que pueda ser transportado de un lugar a otro sin mucha dificultad, lo que significa que este transformador de energía debe ser lo más independiente posible a las condiciones ambientales que se presenten. Esto funcionará, tanto para asegurar el funcionamiento del mecanismo de cosecha de energía, como el funcionamiento de los sensores (estos no pueden ser expuestos a altas temperaturas o a vientos demasiado fuertes, pues sus datos y consumo eléctrico se verá afectado por estas condiciones).

El sistema de captación de energía por vibraciones supone entonces una opción mucho más viable para la autonomía del sistema de monitoreo de puentes. La vibración de los puentes es producida por diversas condiciones ambientales, principalmente por la fluctuación vehicular y el viento. Este presenta una oscilación con frecuencia y aceleración por la parte baja del puente [4].

La vibración del puente dependerá de muchas variables; sin embargo, para su estudio se puede aislar la vibración libre de una viga prismática homogénea simplemente apoyada, con un comportamiento lineal elástico, reduciendo considerablemente los parámetros [1]. Al realizar entonces, un análisis del estado estructural de un puente, se obtiene el contenido de frecuencias vibratorias, en el cual, para la mayoría de los puentes de la república de Panamá, se puede observar un valor máximo que ocurre en las frecuencias bajas, el cual es interpretado como el primer modo de vibración [1]. Este será el modo óptimo para posicionar el cosechador.

Este trabajo está enfocado a la construcción de un sistema generador de energía aprovechando las vibraciones naturales del puente, mediante un cosechador ajustable, que obtiene energía por materiales piezoeléctricos, tomando en cuenta la relación existente entre la longitud del sistema y la frecuencia a la que este vibrará [7], con el fin de optimizar la recolección de energía y poder transportarlo a distintos puentes de un mismo tipo en la república de Panamá.

En el trabajo que se presenta a continuación se describe en la sección 2, el método utilizado para la construcción del generador de energía por vibraciones piezoeléctricas utilizando el material proveniente de los buzzer. Posteriormente, en la sección 3, parte 1, se muestran las mediciones necesarias para determinar el módulo de Young del sistema clavo-borrador y las mediciones sobre el puente del río David, que nos ayudarán a determinar el punto óptimo para posicionar el sistema de generación de energía. En la parte 3, de esta sección, se busca determinar la cantidad de automóviles necesarios que deberán pasar por el puente para que el sistema logre generar una diferencia de potencial mínima de 8V, capaz de hacer funcionar un sistema de monitoreo de puentes simple. Finalmente, en la parte 4 se presentan las conclusiones a las que se llegaron según el análisis de resultados presentado en la sección 3.

2. Materiales y métodos

Los materiales utilizados para la construcción del generador son materiales genéricos y de bajo costo, ya que es un prototipo experimental y no se cuentan con materiales de calidad industrial, como sería lo ideal, sin embargo, para motivos experimentales, resulta económico y eficiente tanto en la metodología de su construcción, como en los materiales.

2.1 Materiales

A continuación, se presenta una descripción breve de los materiales utilizados para el prototipo, el dispositivo ha sido pensado para abastecer un sistema de monitoreo con las especificaciones equivalentes al sugerido en la sección 2.1.1 del documento.

2.1.1 Sistema de monitoreo

El sistema que se presenta fue pensado para un monitoreo de bajo costo y mínimo mantenimiento.

- Placa Arduino Nano
- Sensor acelerómetro: ADXL345, Voltaje de entrada: 3.3V~5V, Voltaje de operación: 2V~3.6V, Corriente de operación: 140μA.
- Adaptador micro SD: Alimentación 4.5V ~ 5.5V, placa de circuito regulador de voltaje de 3,3 V.

2.1.2 Generador eléctrico por vibraciones piezoeléctricas

- Seis sensores piezoeléctricos proveniente de Buzzer o sensor genérico de porcelana o cristal de cuarzo de 5V, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Sensor piezoeléctrico de porcelana, proveniente de Buzzer.

- Seis borradores de goma o corcho flexible
- Dos platinas con las siguientes dimensiones: Espesor: ¼ pulg. (0.6 cm), Largo: 1m y 0.75m, Ancho: 2 pulg (5cm).
- Dos ladrillos con las siguientes dimensiones: Largo: 19.5 cm, Ancho: 9 cm, Espesor: 6cm.
- Cemento
- Goma EPOXI

2.1 Metodología

El Sistema de monitoreo se divide en dos secciones, la primera presenta la parte eléctrica del generador, y la segunda describe la construcción de la estructura de excitación mediante vibraciones.

2.2.1 Diseño y conexión del circuito generador eléctrico por medio de vibraciones piezoeléctricas

Se conectaron los piezoeléctricos en serie, tal como se muestra en la figura 2, conociendo que la parte interna (membrana recubierta por material de color blanco) es positiva y la parte externa es negativa. Las vibraciones emitidas por el puente se transforman en energía eléctrica gracias al material piezoeléctrico. Esta energía se redirecciona por un diodo y se almacena en un capacitor, para utilizarse en el sistema de monitoreo.

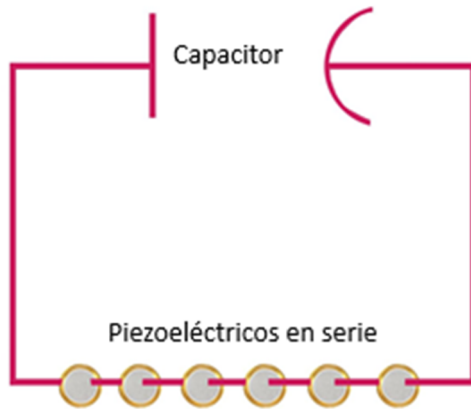


Figura 2. Diagrama del circuito de piezoeléctricos en serie.

Posteriormente, se anexó un circuito doblador de tensión mostrado en la figura 3, el cual permitió aprovechar mucho más el voltaje obtenido por los piezoeléctricos, convirtiendo así, la corriente alterna en directa, para facilitar su cosechamiento, este circuito consta de un puente rectificador, de 4 diodos de 1 A, y dos capacitores de 100 pF a 25V.

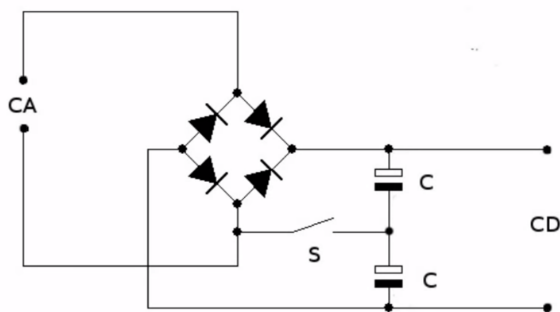


Figura 3. Circuito doblador de tensión con puente rectificador.

2.2.2 Estructura de excitación mediante vibraciones

Se utilizaron dos platinas, una posicionada en la parte inferior de la estructura, a la cual se anexó el circuito de piezoeléctricos. Para la construcción de la parte superior del sistema, se perforó un ladrillo, obteniendo una cavidad de 2 pulgadas de ancho y 0.30 pulgadas de espesor, de modo que la platina posicionada en la parte superior pueda moverse y cambiar su longitud en función de la frecuencia del puente que se monitorea. Este ladrillo se pegó con goma Epoxi a otro ladrillo, añadiendo el peso suficiente a la estructura, para que esta se encuentre en equilibrio. Posteriormente, se diseñó un sistema de borradores con clavos introducidos por la parte superior para contrarrestar el pandeo y se le calculó el módulo de Young del sistema clavo-borrador, para la mejor selección de material de tipo elástico en posteriores estudios. Estos borradores se pegaron a la parte interna de la platina superior, como se muestra en la figura 4, alineados con el circuito de piezoeléctricos, de forma que, al vibrar el puente, estos resortes se encarguen de deformar el piezoeléctrico y producir la diferencia de potencial [7]. Finalmente, se agregó una masa W, encargada de generar una mayor oscilación en el sistema y aumentar el voltaje adquirido debido a la vibración del puente.

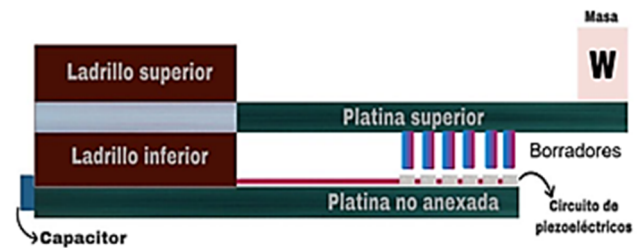


Figura 4. Sistema generador de energía mediante vibraciones piezoeléctricas.

3. Resultados y discusión

En esta sección se encuentran los resultados del generador eléctrico, se presenta dividido en dos partes, la primera muestra los resultados de la prueba de tensión a la que fue sometido el sistema clavo- borrador, para tomar como referencia en una mejor selección de material para mejorar la eficiencia del sistema de excitación (enfocado en un material de mejor calidad y mayor vida útil). La siguiente sección consiste en los resultados de las pruebas del sistema generador, en el puente del río David, en la provincia de Chiriquí.

En esta sección se utiliza nomenclatura técnica para la descripción de parámetros que se monitorean en el puente su definición y utilidad se presenta a continuación y se hace referencia al ISD en la tabla 2:

- ISD: Integral del espectro de poder o densidad espectral de potencia, describe la variación de energía que hay dentro de la señal vibratoria del puente, se midió en los extremos del andén (espacio de circulación peatonal).

3.1 Cálculo del módulo de Young del sistema clavo-borrador

Para la selección del material que excita los piezoeléctricos, produciendo las deformaciones mecánicas, utilizamos borradores de marca Pentel, HIPOLYMER, de un largo de 6.5 cm y un área transversal de 1.32 cm² (adecuándose al tamaño del piezoeléctrico utilizado). En el área transversal superior del borrador insertamos un clavo galvanizado de 1" (2.55cm), proporcionando mayor soporte y menor pandeo al borrador. Posteriormente se calculó el módulo de Young, gracias a la utilización de un Vernier conectado a un sensor de fuerza, al obtener los datos, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el esfuerzo de compresión (Fuerza externa sobre área transversal) y mediante el uso de la aplicación tracker determinamos la deformación longitudinal (elongación entre longitud original) ejercida sobre el sistema clavo-borrador. Determinando, finalmente los datos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Esfuerzo de tensión y deformación longitudinal del sistema

#	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	21212.1212	0.013155
2	40151.5151	0.026308
3	73106.0606	0.037446
4	93181.8181	0.0506
5	171515.152	0.074877
6	189848.485	0.086015
7	207727.273	0.099169
8	255454.545	0.109292
9	280303.03	0.124462
10	306212.121	0.135523
11	344166.667	0.148108
12	365909.091	0.158923
13	391287.879	0.171077

Posteriormente se realizó el gráfico que muestra la relación entre el esfuerzo de tensión y la deformación longitudinal del material, al cual se le aplicó una regresión lineal y se aproximó la ecuación (1) que describe el comportamiento mecánico del sistema clavo – borrador.

Ecuación de regresión lineal para el módulo de Young del sistema clavo-borrador.

$$Y = 4 \times 10^{-7} X + 0.0079 \quad (1)$$



Figura 5. Gráfica de deformación longitudinal ante el esfuerzo de compresión

3.2 Pruebas realizadas sobre el puente del río David

El puente del Río David tiene una longitud total de 120m, con dos luces de 42m cada una, los datos que se recolectaron fueron tomados cada 0.25L en ambas luces, de ambos lados del paso peatonal (al borde de la carretera, es decir, por la pared y pegado a la barandilla). De todas las pruebas realizadas, se obtuvieron mayores medidas de aceleración, desplazamiento y voltaje a los 45.5m del origen del puente, justo sobre el apoyo, los datos obtenidos en las distintas mediciones en ese punto específico se sintetizan en la Tabla 2:

Tabla 2. Integral de espectro de poder a cada 0.25L

Intervalo de medida de distancia en la luz	Distancia	ISD (Tubo)	ISD (Pared)	Proporción ISD1 y ISD2
0	0	0.15	0.042	3.572
0.25	10.5	0.12	0.088	1.364
0.5	21	0.14	0.075	1.867
0.75	31.5	0.11	0.046	2.391
1	42	0.086	0.034	2.529
	44	0.072	0.03	2.4
0	46	0.091	0.031	3.033
0.25	56.5	0.061	0.041	1.488
0.5	67	0.12	0.084	1.429
0.75	77.5	0.11	0.061	1.803
1	88	0.07	0.037	1.892
	Promedio	0.103	0.052	2.161
			COV	32%

Como se puede observar en la figura 6, para los puntos medidos, la integral del espectro de poder se encuentra entre 1.36 y 3.57 veces mayor en el lado de la barandilla que en el lado de la pared adyacente a la carretera, con un promedio de 2.16 veces mayor. Esto se puede corroborar en la figura 7, en donde observamos que la aceleración máxima y el ISD máximo se produce en el extremo del andén que está pegado a la barandilla (Tubo), en esta gráfica también se observa que a mayor aceleración pico, mayor variación energía.

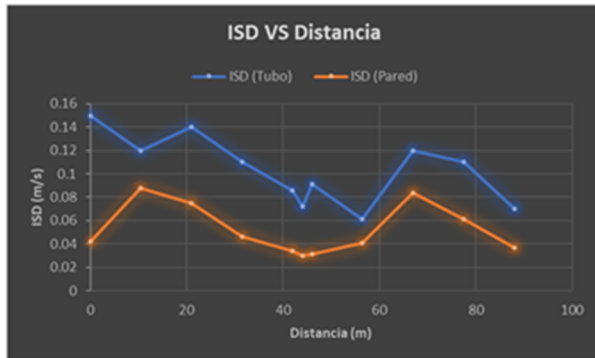


Figura 6. Gráfica de Integral del espectro de poder vs distancia.

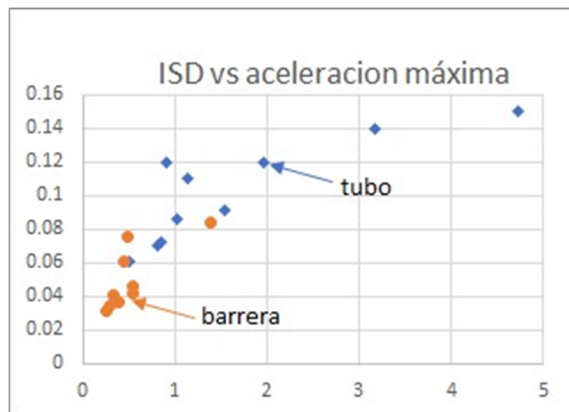


Figura 7. Gráfica de Integral del espectro de poder vs aceleración máxima.

3.2.1 Medidas de Frecuencia y aceleración a 45.5m del inicio del puente

Estas medidas fueron tomadas mediante la aplicación VibSensor, con un rango de datos de 10Hz, por medición, durante 10 minutos:

Puntos 5999

Brechas: Ninguna

Pico Crudo: X(0.68); Y(0.17); Z(10.00)

Densidad espectral integrada (ISD): X(0.021) Y(0.012) Z(0.038).

Resonancias: X: 2.5Hz (0.00033) - Y: 2.2Hz (0.00011)

Amplitud de la velocidad cuadrática media (rms): X(0.021)

Y(0.012) Z(0.038).

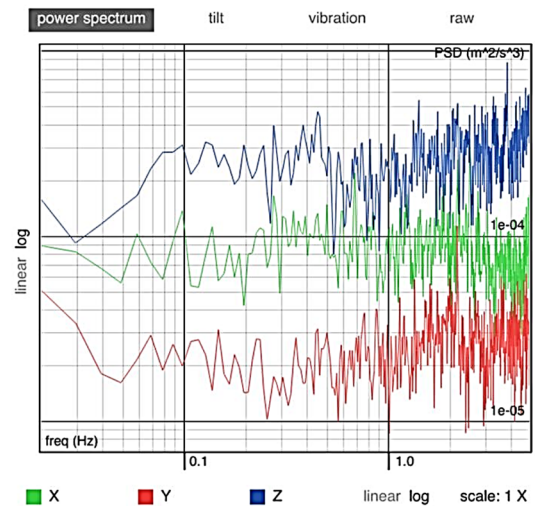


Figura 8. Gráfica de Integral del espectro de poder (ISD) a 45.5 m del inicio del puente.

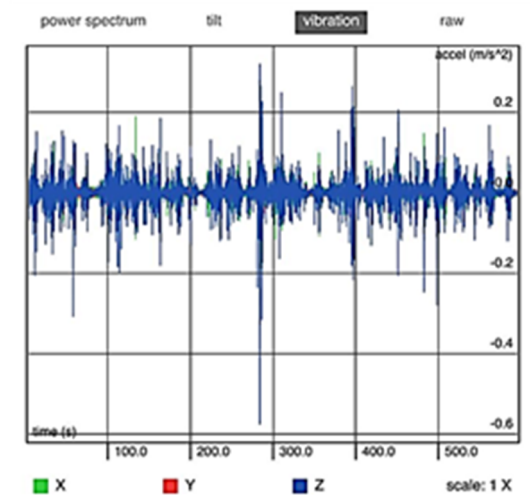


Figura 9. Gráfica de Vibración del puente a 45.5m del inicio (exactamente sobre el apoyo).

3.2.2 Medidas de voltaje máximo obtenido en el puente

Los datos de mayor voltaje (voltaje vs distancia) obtenidos en las medidas de 0.25L de ambas luces del puente del Río David, se sintetizan en la figura 10.

Estos datos fueron obtenidos con el circuito simple de piezoeléctricos en serie, sin haber anexado el circuito doblador de tensión.

En la gráfica de la figura 10 podemos observar que el mayor voltaje obtenido en los capacitores es de 6V a 45.5m del origen del puente, (Justo sobre el apoyo) lo que coincide con los datos obtenidos de frecuencia y aceleración del puente.

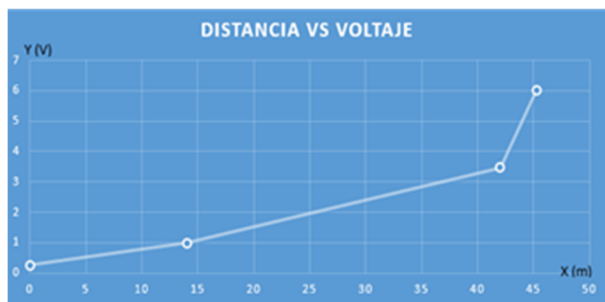


Figura 10. Gráfica de voltaje obtenido por los piezoelectricos a lo largo de todo el puente.

Se excitó el sistema de forma manual, ya que el clima y el tiempo no permitieron que se pudiera poner a prueba en el puente, los datos obtenidos de voltaje vs tiempo se muestran en la tabla 3 y en la gráfica presentada en la figura 11.

Tabla 3. Almacenamiento de energía

Almacenamiento de energía en capacitores	
Tiempo (minutos)	Voltaje (V)
0	0.1
0.24	0.31
0.42	0.55
0.5	0.78
7.38	7.32
8.01	7.68
8.06	7.8
8.11	7.92
8.19	8
8.25	8.1

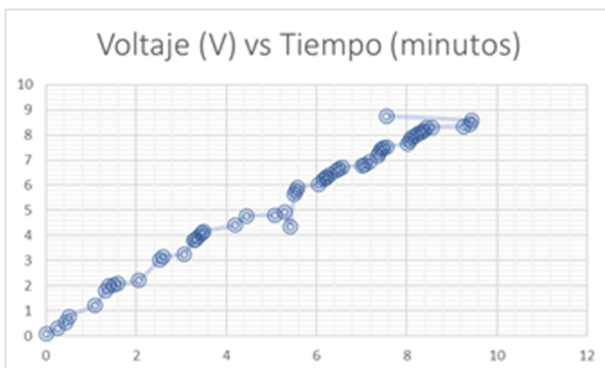


Figura 11. Gráfica de Voltaje almacenado, con respecto al tiempo.

4. Conclusiones

- El monitoreo de los puentes puede ser altamente beneficiado al utilizar un sistema generador de energía por vibraciones piezoelectricas, ya que esto permitirá un sistema autosuficiente que no necesita de

supervisión, disminuyendo así en gran medida por las horas de trabajo en monitoreo.

- La generación de energía por vibraciones piezoelectricas supone un gran avance para el desplazamiento de energías no renovables, como energía química producida por las baterías, beneficiando en cierta medida, el desarrollo sostenible de la ciudad y creando vías alternas para el cosechamiento de energía limpia.
- La segunda etapa del proyecto consiste en la implementación del sistema de monitoreo de elección, utilizando como fuente de alimentación el sistema de generación, teniendo como un objetivo más específico, adaptar el sistema de monitoreo óptimo, al generador de energía por vibraciones piezoelectricas.

AGRADECIMIENTOS

La realización de la investigación fue posible gracias a la ayuda del Ingeniero José Manuel Gallardo, el profesor José Dimas Calvo, y los diferentes equipos de investigación de la facultad de Sistemas computaciones de la Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Chiriquí.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Gallardo, O. Araúz. S. Rodríguez, "Estudio del período de vibración de puentes de concreto en Panamá", *Revista I+D Tecnológico*, vol. XIII, n° 1, p. 8, 2017.
- [2] C. F. Sohn, "A review of structural health monitoring literature: 1996–2001", *Los Alamos National Laboratory*, vol. 4, n° 6, p. 27, 2009.
- [3] V. Kaur, "Activation matrix oriented base station implementation for energy optimization in wireless sensor networks", *International Journal of Computing and Corporate Research*, vol. 4, n° 4, 2014.
- [4] D. T. Fujino, "Control, simulation and monitoring of bridge vibration" de *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II*, Japón, 2010.
- [5] J. Kala, "Footbridge response on single pedestrian induced vibration analysis", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 3, n° 2, pp. 548-559, 2009.
- [6] O. Salawu, "Detection of Structural Damage trough changes in frequency: a review", *Elsevier Sciences*, vol. 19, no. 9, pp. 718723, 1997
- [7] F. U. Khan, F. Ahmad, "Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations", *Shock and Vibration*, vol. 2016, 2016. doi: 10.1155/2016/1340402